

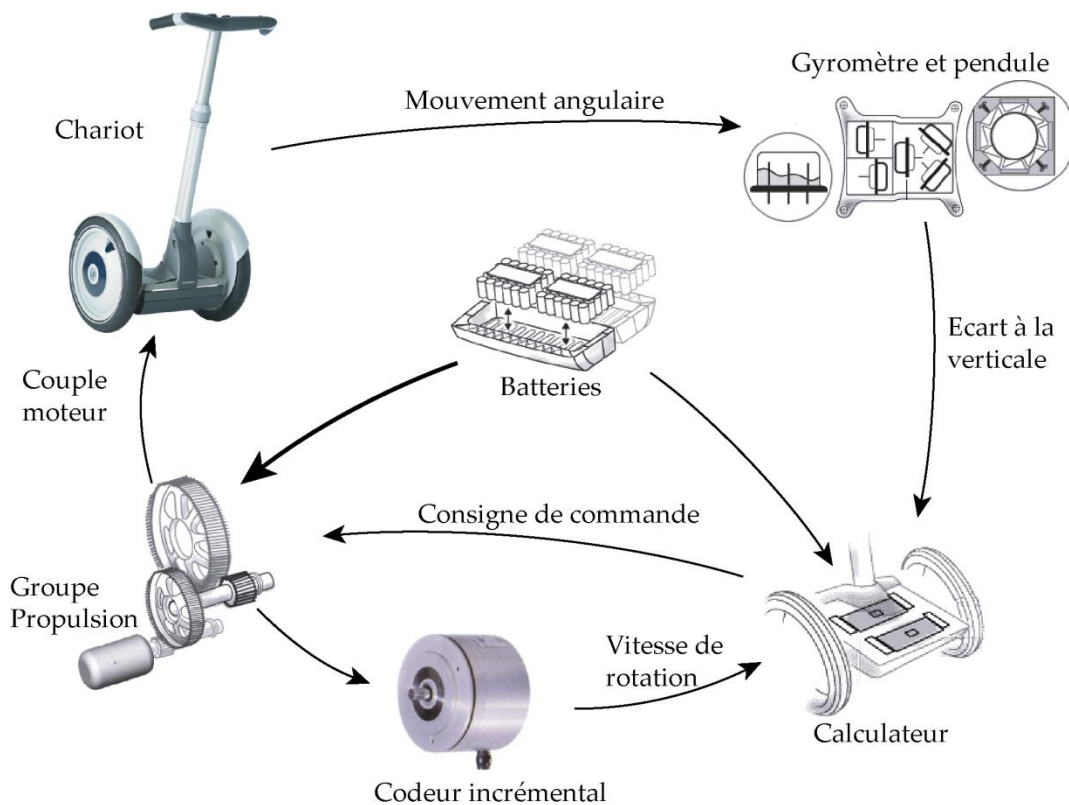


TD moteur synchrone du SEGWAY

VEHICULE AUTO BALANCE DE TYPE SEGWAY

Le support de l'étude est le véhicule auto balancé Segway. Il s'agit d'un moyen de transport motorisé qui permet de se déplacer en ville. En termes de prestations, il est moins rapide qu'une voiture ou qu'un scooter, mais plus maniable, plus écologique, moins encombrant et nettement plus moderne.

La conduite du Segway® se fait par inclinaison du corps vers l'avant ou vers l'arrière, afin d'accélérer ou freiner le mouvement. La spécificité de ce véhicule est d'avoir deux roues qui ont le même axe de rotation, avec son centre de gravité situé au-dessus de l'axe commun des roues. Le système comporte un dispositif d'asservissement d'inclinaison, maintenant la plate-forme du véhicule à l'horizontale. Ces régulations sont possibles grâce à différents capteurs et une unité de traitement numérique à base de microprocesseurs transmettant des consignes aux variateurs des deux moteurs électriques équipant les deux roues.



La transmission de puissance choisie possède deux moteurs électriques (un pour chaque roue), associé chacun à un réducteur. Les machines électriques doivent pouvoir fonctionner dans les quatre quadrants.

1. Etude des moteurs avec leurs alimentations

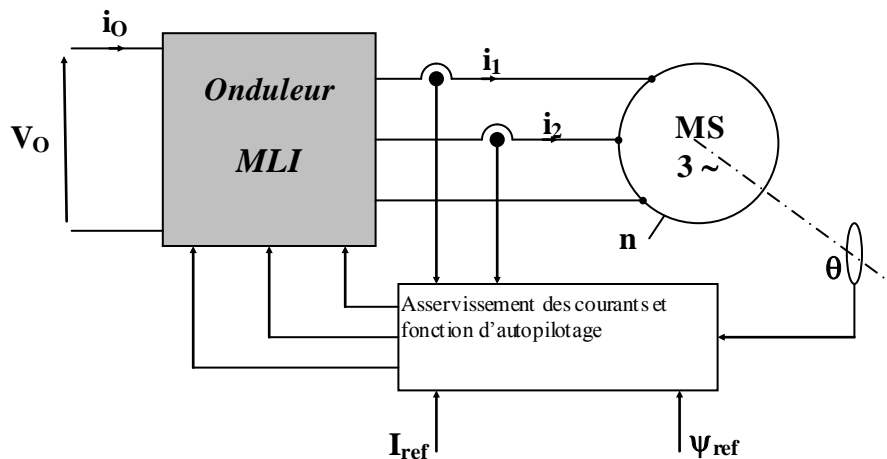
Les deux moteurs associés chacun à un réducteur de rapport de réduction $|K_r| = \frac{1}{24}$,

d'une puissance de 1,5 kW, sont des machines Brushless (*machines synchrone à aimants permanents*) à une paire de pôles.



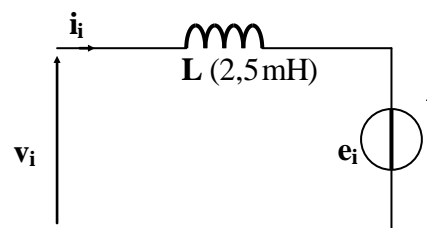
Pour que ces machines fonctionnent à vitesse variable en moteur et en générateur (mode freinage électrique), il faut imposer la phase des courants dans la machine en fonction de la position du rotor donnée par le codeur incrémental (fonctionnement d'autopilotage). Ainsi la fréquence des courants est en permanence proportionnelle (*synchrone*) à la fréquence de rotation.

La commande des 2 roues étant identique, l'étude portera sur une seule. La structure de commande donnée ci-dessous permet d'imposer l'amplitude du courant I_{ref} et l'angle d'autopilotage ψ_{ref} . L'angle ψ correspond au déphasage entre le courant et la fém., et I_{ref} à l'amplitude des courants de la machine (*lettre minuscule : valeur électrique instantanée*). La tension V_O est la tension délivrée par la batterie soit 72V.



1.1. Sachant que la vitesse maximale du Segway est de 20 km/h et que le rayon R d'une roue est de 24 cm, calculer la vitesse maximale Ω_{max} de rotation des moteurs en rad/s puis en tours/min. En déduire la fréquence f_{max} des grandeurs électriques statoriques.

Chaque machine est modélisée par le modèle de Behn-Eschenburg, la résistance de chaque phase est négligée. La figure ci-contre présente le schéma équivalent par phase de la machine, ainsi que les conventions utilisées. L'indice représente le numéro de la phase, i est égal à 1, 2 ou 3.



On note :
 - φ le déphasage entre le courant i_i et la tension v_i ,
 - ψ le déphasage entre le courant i_i et fém e_i .

On suppose que la valeur efficace de la fém induite est liée à la vitesse Ω du moteur en rad/s par :

$$E_{ieff} = K\Phi\Omega \text{ avec } K\Phi = 86 \cdot 10^{-3} \text{ Vs/rad.}$$

1.2. Montrer que le couple électromagnétique C_{em} d'une machine peut se mettre sous la forme : $C_{em} = k_{em} I_{ieff} \cos \psi$
 Déterminer la constante k_{em} .

1.3. Pour quelle valeur ψ , ce couple est-il maximum ? Comment est appelé de cet angle ? On supposera cette condition réalisée.

1.4. Tracer le diagramme de Behn-Eschenburg (diagramme de Fresnel) pour $\psi = 0^\circ$, en respectant les ordres de grandeur des amplitudes et des angles. Ecrire sur le diagramme le nom de chaque vecteur et chaque angle. On prendra comme origine des phases le courant i_i .

La commande de l'onduleur permet d'imposer un rapport $\frac{V_{ieff}}{f}$ constant.

- 1.5. Que devient ce diagramme lorsque la vitesse de rotation du moteur change ? Justifier votre réponse. On rappelle que $L\omega$ dépend aussi de la vitesse de rotation.
- 1.6. Calculer pour la vitesse maximale Ω_{max} , trouvée en 1.1, et pour une tension V_{ieff} de 50V, les valeurs numériques de I_{ieff} et de φ si $\psi = 0^\circ$.
- 1.7. Calculer pour ce point de fonctionnement ($\Omega = \Omega_{max}$), la puissance absorbée par le moteur P , le couple électromagnétique C_{em} ainsi que le couple en sortie du réducteur C_m .

On s'intéresse maintenant à un point de fonctionnement quelconque.

- 1.8. Exprimer la puissance P absorbée par le moteur en fonction de V_{ieff} , I_{ieff} et φ . En déduire les conditions sur φ permettant le réglage du sens de transfert de l'énergie.
- 1.9. Représenter les diagrammes de Behn-Eschenburg pour $P > 0$ puis $P < 0$, on supposera $\Psi \neq 0^\circ$. On prendra comme origine des phases la tension v_i .
- 1.10. Cette transmission de puissance répond-elle aux spécificités du Segway énoncées dans la présentation ?

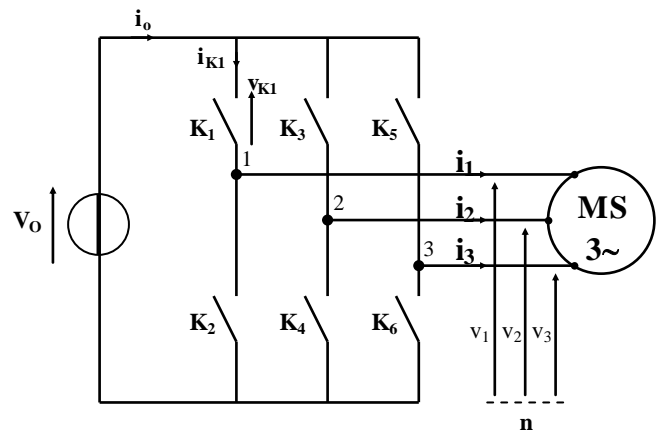
2. Etude des onduleurs

La carte de commande du Segway comprend l'ensemble de l'électronique de commande, de puissance, et la gestion de l'énergie. Un onduleur à interrupteurs MOSFET est nécessaire pour alimenter un moteur.

La structure de l'onduleur est donnée ci-dessous. On suppose que les interrupteurs électroniques sont parfaits et que les courants dans les phases de la machine sont sinusoïdaux.

Chaque interrupteur est repéré par un symbole ($K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$), le même symbole désigne aussi sa variable logique de commande :

$K_1 = 1$ signifie que l'interrupteur K_1 est fermé alors que $K_1 = 0$ signifie que K_1 est ouvert.

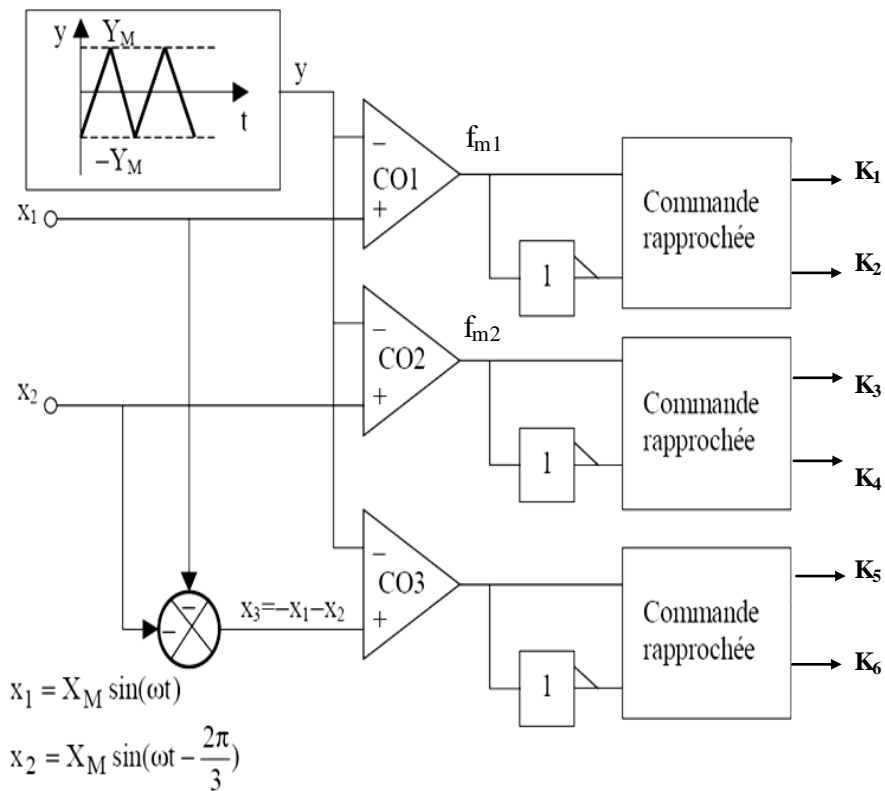


- 2.1. Expliquer pourquoi il est nécessaire d'avoir une commande complémentaire pour chaque bras de l'onduleur.

Le principe du circuit de commande de cet onduleur est basé sur la comparaison de sinusoïdes de références (x_1, x_2 et x_3) de fréquence f et d'amplitude maximale X_M à un signal triangulaire (y), appelé modulante, de fréquence de découpage élevée F_D et d'amplitude maximale Y_M . Le schéma synoptique suivant explicite ce principe.

Les comparateurs CO1, CO2 et CO3 sont dotés de sorties logiques dont les niveaux sont compatibles avec les inverseurs et les entrées du circuit de commandes rapproché.

L'étude portera sur la tension composée $u_{12} = v_1 - v_2$, le raisonnement étant identique pour les deux autres phases. On appelle f_{m1} et f_{m2} les fonctions de modulations, si $x_i > y$ alors $f_{mi} = 1$ et si par exemple $f_{m1} = 1$, K_1 est fermé.



- 2.2. Compléter le tableau fourni dans le document réponse permettant de trouver la valeur instantanée de $u_{12}(t)$ en fonction de V_O et des fonctions binaires $f_{m1}(t)$ et $f_{m2}(t)$.
- 2.3. Compléter le document réponse en représentant les fonctions binaires $f_{m1}(t)$ et $f_{m2}(t)$, en déduire la représentation de la tension instantanée $u_{12}(t)$.
- 2.4. Montrer que $u_{12}(t)$ peut se mettre sous la forme : $u_{12}(t) = V_O F(t)$. Exprimer $F(t)$ en fonction des modulantes $f_{m1}(t)$ et $f_{m2}(t)$.

La décomposition en série de Fourier de la modulante $F(t)$ donne :

$$F(t) = \frac{X_M \sqrt{3}}{2Y_M} \sin\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{6}\right) + \sum_{h=1}^{\infty} \frac{4(-1)^h}{\pi h} K_h \cos(h2\pi F_D t)$$

- 2.5. Représenter l'allure du spectre en fréquence de u_{12} en supposant que $f = 100\text{Hz}$ et $F_D = 10\text{kHz}$.
- 2.6. Calculer la valeur efficace du fondamental de $u_{12}(t)$, notée U_{eff} en fonction de V_O , X_M et Y_M . Quelle grandeur permet le réglage de U_{eff} ?
- 2.7. Conclure sur l'intérêt de cette commande de l'onduleur appelée MLI intersective.

Réponse à la question 2.2

f_{m1}	0	1	0	1
f_{m2}	0	0	1	1
u_{12}				

Réponse à la question 2.3

